

Kraków dn. 12.12.2022r.

Recenzja pracy doktorskiej p. Mateusza Krzykowskiego
pt. *Dynamika spinów dziurowych w strukturach półprzewodnikowych*

Praca została przygotowana pod opieką promotora prof. Pawła Machnikowskiego oraz promotora pomocniczego dr Michała Gawęłczyka na Politechnice Wrocławskiej. Doktorant wykonywał badania ze wsparciem projektu „Diamentowy Grant” MNiSW na lata 2017-2021. W czasie studiów doktoranckich Autor rozprawy opublikował trzy prace w Physical Review B. W jednej występuje jako pierwszy Autor, w dwóch pozostałych jako drugi. W związku z badaniami doktorskimi zgłoszony jest również jeden manuskrypt. Doktorant był aktywny na konferencjach. W latach 2017-2021 prezentował swoje wyniki 12 razy.

Badania doktorskie dotyczyły właściwości spinowych dziury w kropkach kwantowych InGaAs/GaAs, zjawisk relaksacji spinu, czynnika Landego, efektów sprzężenia stanów spinowych w układach podwójnych oraz skutków obniżenia symetrii przez geometrię, skład, zewnętrzne pole elektryczne itp. Spin uwięzionej dziury jest od wielu lat wskazywany jako atrakcyjny dla przetwarzania informacji kwantowej ze względu na słabsze sprzężenie z polem nadsubtelnym. Doktorant wskazuje, że zastosowanie spinów uwięzionych nośników do kwantowych technik informacyjnych jest przedmiotem spekulacji od dekad. Należy dodać, że o ile w kropkach o uwięzieniu strukturalnym, rozważanym w rozprawie, prace w tym kierunku istotnie nie postępują bardzo szybko, na bardziej zaawansowanym poziomie są prace dla kropek o uwięzieniu sterowanym elektrycznie w czystym izotopowo krzemie 28 (np. Philips i inni, *Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon*, Nature 609, 919 (2022)).

Autor wykorzystuje warsztat badawczy rozwijany od lat w grupie promotora, prof. Pawła Machnikowskiego. Stosowane podejście opiera się na modelowaniu k.p nośników w kropkach kwantowych z realistycznym potencjałem uwięzienia uwzględniającym efekty odkształceń wynikających z różnicy stałej sieci materiału kropki i matrycy oraz drganiem sieci krystalicznej.

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. +48 12 617 2951, +48 12 633 3740, fax +48 12 634 00 10

Reflex

Rozprawą doktorską w tym postępowaniu nie jest cykl publikacji. Należy więc ją traktować jako „maszynopis książki” w związku z ustawą o stopniach i tytule (Art.13.2) obowiązującą do tego postępowania. Rozprawa zawiera trójstronicowy wstęp oraz 5 rozdziałów mieszczących się na 91 stronach łącznie. Rozprawa opatrzona jest literaturą (88 pozycji), spisem oznaczeń, tabel i rysunków.

Rozdział pierwszy omawia, na sześciu stronach, w sposób hasłowy półprzewodniki, fonony, nośniki ładunku, odkształcenia, kropki kwantowe i metody ich wytwarzania.

Rozdział drugi na stronach ośmiu podaje zarys teorii, modelu k.p, efektów odkształceń, sprzężenia spin-orbita oraz oddziaływanie z polem fononów. W tym miejscu, Autor opowiada o hamiltonianie k.p i jego modułowej strukturze, przy czym sam hamiltonian nie jest podany. Czytelnik jest odsyłany w tej kwestii do literatury. O ile taka forma byłaby naturalna dla przewodnika do cyklu publikacji, manuskrypt książki powinien zawierać zasadnicze wzory.

Rozdział trzeci dotyczy odwrócenia (relaksacji) spinu w pojedynczej kropce kwantowej. Oryginalne wyniki zostały opublikowane w pracy PRB 102, 205301 (2020), w której Doktorant jest pierwszym Autorem. Hamiltonian uwzględnia sprzężenie dziury z fononami akustycznymi. Autor wyróżnia mechanizmy relaksacji: 1) domieszkowy (związany ze strukturą stanu własnego dziury i składową o mniejszościowym spinie), w którym rolę pola fononowego jest odbiór energii przy relaksacji, oraz 2) bezpośredni, związany z lokalnym oddziaływaniem spin-orbita wynikającym z odkształceń. Autor wskazuje, że w drugim mechanizmie relaksacja zachodzi z udziałem składowych lekkodziurów w stanach uwięzionego nośnika. Badane są modele soczewkowych kropek InGaAs w matrycy GaAs z warstwą zwilżającą, w tym model z kropkami otoczonymi przez warstwę stopu redukującą naprężenia. Struktury dobrane są tak aby obydwie charakteryzował je ten sam czynnik Landego dla uzgodnienia wartości rozszczepienia Zeemana istotnej dla czasu relaksacji. Dla pól magnetycznych poniżej 10T dominującym kanałem relaksacji spinu jest sprzężenie piezoelektryczne z fononami, z charakterystyczną zależnością od pola magnetycznego w potęgze piątej. Powyżej 10T znaczące staje się również sprzężenie z fononami

przez potencjał deformacyjny. Tempo relaksacji jest 1.5 – 2 razy większe dla układu bez warstwy redukującej naprężenia. Autor bada zależności potęgowe tempa relaksacji od pola magnetycznego. Następnie Doktorant bada fononowe gęstości spektralne dla ustalonego, niskiego pola oraz sprzężenia piezoelektrycznego, w zależności od poszczególnych składowych hamiltonianu k.p. W strukturze z warstwą redukującą odkształcenia efekt naprężeń dwuosiowych jest słaby, a całkowita gęstość spektralna ma blisko trzykrotnie obniżone maksimum.

Do modelowania widma i charakteryzacji relaksacji spinowej Autor wprowadza hamiltonian efektywny w bazie sześciu stanów o pasmowym momencie pędu $-3/2$ i $+3/2$ oraz orbitalnego momentu pędu 0 , $+1$ oraz -1 . Parametry hamiltonianu efektywnego dopasowane są do wyników modelowania k.p. Hamiltonian efektywny dobrze odtwarza tempo relaksacji od dominującego efektu piezoelektrycznego. Model nie sprawdza się do opisu słabszego sprzężenia przez potencjał deformacyjny, dla którego w opisie dokładnym ważny przyczynek wprowadzają pasma lekkodziurowe.

Rozdział czwarty zawiera wyniki badań nad wartościami czynnika Landego w pojedynczej oraz podwójnych kropkach dla pola magnetycznego zorientowanego w kierunku wzrostu i w płaszczyźnie kropki. Problem jest złożony, szczególnie dla podwójnych kropek, ze względu na naturę sprzężenia kropek: przez orbitale dziur oraz przez pole odkształceń. W układzie modelowym stosuje się dwie kropki o różnych rozmiarach. Czynniki g są ujemne, większe co do modułu dla pola w kierunku wzrostu, niż w płaszczyźnie. Uwzględnienie obecności drugiej kropki powoduje pojawienie się dodatnich czynników żyromagnetycznych dla stanów dziurowych w górnej kropce. Badane są efekty związane z rozkładem indu, rozmiarem kropek, odkształceniem eliptycznym, polem elektrycznym i magnetycznym. Autor znajduje kwadratową zależność czynnika żyromagnetycznego od pola dla pól rzędu 10T.

Rozdział czwarty pozostawia niedosyt: Autor prezentuje wyniki, które nie są zrozumiane („zagadkowa” granica niskich kropek na rysunku 4.5), albo które warto by zbadać (anizotropia czynnika g w płaszczyźnie, jednolite pole odkształceń), ale badań nie podjęto. Niektórych komentarzy nie rozumiem: Na rysunku 4.8 na ostatnich dwóch punktach na wykresie w funkcji promienia górnej kropki kwantowej następuje skok. Autor tłumaczy, że kropka jest na tyle

duża, że stan podstawowy staje się typu p i jednocześnie, że wynik jest związany z ograniczeniami metody rachunkowej. Czy ten efekt jest artefaktem metody, czy stoi za nim zmiana charakteru stanu podstawowego dla dużej kropki kwantowej? Kwadratowa zależność czynnika g od pola magnetycznego uzyskiwana dla dużych pól (składowa sześcienna w wyrażeniu na rozszczepienie Zeemana – wzór 4.7), wymagałaby komentarza, wyjaśnienia i/lub wskazania związku z wynikami literaturowymi. Przy dyskusji odkształcenia eliptycznego Autor wskazuje, że tensor g nie jest diagonalny jak zakładano w równaniu (4.4). Autor odsyła czytelnika do następnego rozdziału. W rozdziale czwartym Autor wielokrotnie podnosi łamanie symetrii. Problem symetrii jest lepiej wyjaśniony w następnym rozdziale. Być może rozdziały czwarty i piąty powinny być podane w odwróconej kolejności. Na rysunkach 4.17 i 4.18 występują nieciągłości w czynniku g . Doktorant zaznacza, że jako czytelnik nie powinienem być zdziwiony, ponieważ pole „elektrycznie całkowicie zniósło symetrię układu”. Ja jednak pozostaję zdziwiony, pole elektryczne gdy się pojawi, to symetrię układu może znieść. Dlaczego od pewnego pola następuje „całkowite zniesienie symetrii”. Czy mamy tutaj do czynienia ze zmianą kolejności poziomów energetycznych w widmie i np. zmianą charakteru stanu dziurowego w górnej kropce? W następnym rozdziale Autor wraca do rysunku 4.18 i wyjaśnia formę czynnika tensora g dla różnych grup symetrii. Czy w rozdziale 4 było więc stosowane założenie diagonalnego tensora g jak podano przy wzorze (4.4) czy nie? W rozdziale 5 Autor wskazuje, że na rysunku 4.18 doszło do obniżenia przez pole elektrycznego symetrii z C_{2v} do C_1 . Czy konkretna wartość pola znosi tę symetrię i wywołuje nieciągłość czynnika g ? Wartości g wydobywane są z widma (równanie 4.5). Jak więc wygląda widmo przy nieciągłości g ?

W rozdziale piątym – Doktorant zajmuje się sprzężeniem stanów spinowych w podwójnych kropkach kwantowych, mierzonym przez szerokość antykrossingu poziomów zlokalizowanych w różnych kropkach w funkcji pola elektrycznego zorientowanego w kierunku wzrostu. Odpychanie poziomów zachodzi dla stanów o tym samym spinie, ale może pojawić się również dla stanów o przeciwnym większościowym spinie jako wynik oddziaływania spin-orbita. Szerokość odpychania poziomów energetycznych zmienia się przy dodatkowym obniżeniu symetrii układu. Autor wymienia grupy symetrii punktowych, definiuje miarę symetrii układu oraz podaje formę tensora żyromagnetycznego dla każdej grupy symetrii. Autor bada zależność szerokości sprzężenia od przesunięcia i deformacji

kropek w płaszczyźnie, od pola elektrycznego w płaszczyźnie, wzajemną kompensację tych dwóch efektów itp. Podobnie jak dla rozdziału 4 chciałbym na obronie zobaczyć jak wyglądają widma, które powodują nieciągłości w wartości sprzężenia (np. rysunek 5.11(c)). Autor bada czynnik g , inaczej zdefiniowany niż w rozdziale 4, oraz wskazuje na rolę składowej lekkich dziur w sprzężeniu stanów.

W tekście są błędy językowe lub niejasne sformułowania, na przykład na stronie 21 „pozornie mogło arbitralna wartość”, na tej samej stronie w przypisie „Rysunek ... może się tutaj wydawać złudny ze względu na uśrednienie Gaussowskie”. Rozprawa skorzystałaby z dokładniejszej korekty.

Wykaz symboli znajduje się po spisie treści. Autor wprowadza tam trzy kolizje oznaczeń: c jako prędkość dźwięku i koncentracja indu, h jako wysokość kropki kwantowej oraz operator anihilacji dziury i V jako objętość i potencjał.

W wyrażeniu dla funkcji falowej (3.5b) w części orbitalnej brakuje mnożenia przez r_0 potrzebnego dla uzyskania odpowiedniej zależności funkcji falowej od odległości od osi dla orbitalnego momentu pędu równego co do modułu 1. Orbitalna funkcja falowa (3.5b) bez mnożenia przez r_0 nie jest unormowana.

Niezależnie od powyższych uwag, rozprawa z pewnością dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w zakresie nauk fizycznych i półprzewodnikowych kropek kwantowych w szczególności. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemów związanych ze spinem dziurowym w kropkach InGaAs/GaAs. Wyniki przedstawione w rozprawie są cenne i w części opublikowane.

Rozprawa w mojej opinii spełnia ustawowe kryteria stawiane pracom doktorskim i rekomenduję dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Bartłomiej Szafer